

氏 名	藤井 康彦
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博甲第872号
学位授与の日付	平成19年3月22日
学位授与の要件	課程博士(学位規則第4条第1項)
学位授与の題目	膨張弁絞り機構部における気液二相流体现象の研究
論文審査委員(主査)	木村 繁男(自然計測応用研究センター・教授)
論文審査委員(副主査)	上野 久儀(自然科学研究科・教授), 瀧本 昭(自然科学研究科・教授), 木綿 隆弘(自然科学研究科・助教授), 児玉 昭雄(自然科学研究科・助教授)

Summary

Low acoustic noise operating systems are in great demand for room air conditioner these days. Because of the significant noise reduction achieved in various other components, such as fans and compressors, the expansion valve for refrigerant has been drawing a particular attention as a source of noise in a last decade. The noise generated at the expansion valve is very important due to the fact that it can easily propagate along the piping system, causing a great trouble in over-all low-noise operations. We performed both visualization of two-phase flows passing through the valve throttle and acoustic noise measurement there. In general it is found that the two-phase slug flows in upstream of the throttle cause unpleasant acoustic noise. Based on our observations, a new throttle shape has been proposed, aiming at a smoother flow pass at the throttle inlet. The new design has been tested in the same experimental system, and a better performance has been proved. Using the same technique developed in our earlier papers, we visualize the two-phase refrigerant flows in both far upstream and far downstream locations from the throttle. It is found that the upstream two-phase flow regimes are depending on which design we install for the experiments, even though the flow rate and the valve opening are the same. This fact indicates that the throttle design can influences the over-all two-phase refrigerant flows in the entire upstream piping system.

1. 本研究の背景

近年、家庭用及び事務所・店舗用の空気調和装置において、高機能化・低コスト化・省エネ・小型化と並び、低騒音化が重要機能に位置付けられてきた。

家庭用及び事務所・店舗用の空気調和装置は、室外機と室内機を分離した構成が主流を占めている。室外機は、主な機能部品として圧縮機、熱交換器、送風機、冷暖切替用四方弁及び絞り機構部を持つ膨張弁から構成されている。また、室内機は熱交換器、送風機等から構成されている。

空気調和装置から発生する騒音は、大別すると圧縮機の騒音、送風機ファンの送風音、送風機を駆動するモーター音、電磁弁等の機能部品の作動音と冷媒が配管内を流動する際に冷媒の流れに起因して発生する冷媒流体音、振動音がある。従来は、圧縮機や送風機ファン、モーター音や、機能部品類の作動音が

大きかったため、冷媒の流れに起因して発生する騒音は特に、問題視されなかった。ところが、近年の騒音に関する空気調和装置システムの技術レベル向上により、それらが急速に改善された結果、冷凍サイクル内で冷媒の流れに起因して発生する冷媒流体音・振動音が、問題となる騒音としてクローズアップされてきた。特に、膨張弁の絞り機構部で発生する冷媒流体音の低減が重要となってきた。

冷媒が膨張弁の絞り機構部を通過する際に発生する冷媒流体音は、従来から発生しており、システムとしての研究がなされている。しかしながら、最も基礎となる膨張弁の絞り機構部の冷媒流れに焦点をあて、且つ実際に使用される膨張弁の絞り機構部形状を用い、冷媒流れの可視化と計測による実験で気液二相の基礎的な流体现象を解明した研究は、ほとんど見当たらなかった。

2. 膨張弁の機能

膨張弁の機能について、冷房時を例にして説明する。膨張弁は図1の空気調和装置の冷凍サイクルシステムに使用される。圧縮機で圧縮された高温・高圧のガス冷媒は四方切換弁を通り、室外熱交換器で熱交換され高圧の液体になる。高圧の液冷媒は膨張弁に入り、膨張弁の絞り機構部を通過すると急速に膨張し、低温・低圧の気体になり室内熱交換器へ流入する。室内熱交換器では熱交換が行われ、室内の冷房を行った後、冷媒は圧縮機へもどる。

膨張弁は、図2に示すように、電磁コイルと永久磁石から成るローターとでステッピングモーターを構成する。空気調和装置の制御部から電気信号を電磁コイルが受けると、ローターが回転する。ローターと一体成形されたニードルは、ローターの回転と共に回転し、ボデー弁口部と構成する絞り機構部の開口断面積（弁開度）を変化させ、絞り機構部を通過する冷媒流量が制御される。

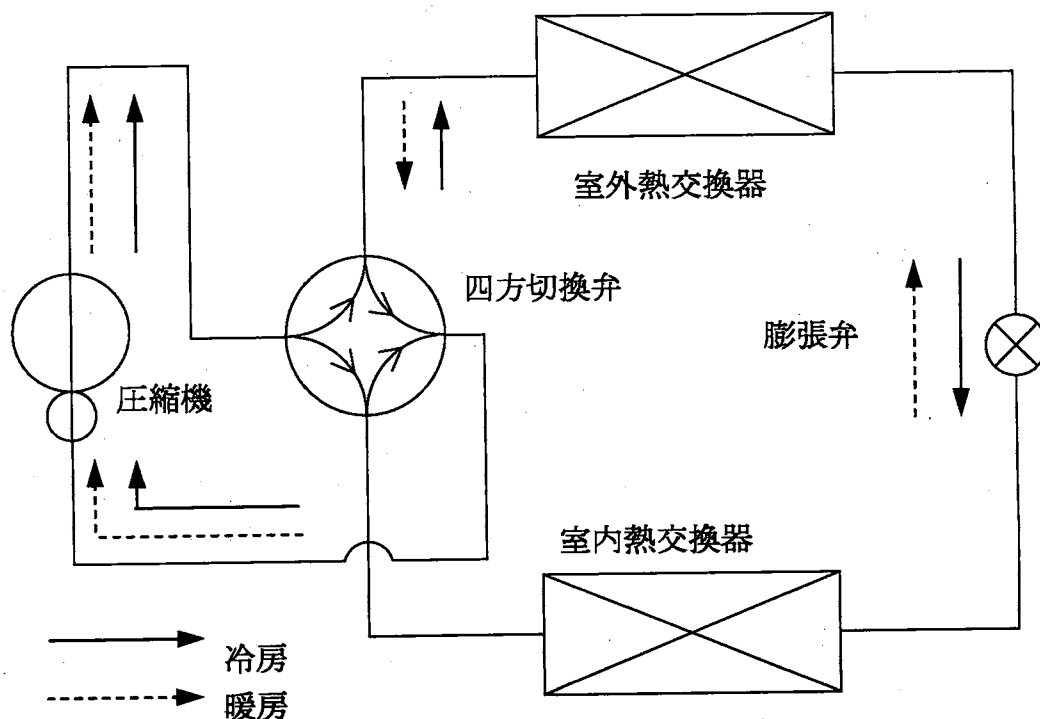


図1

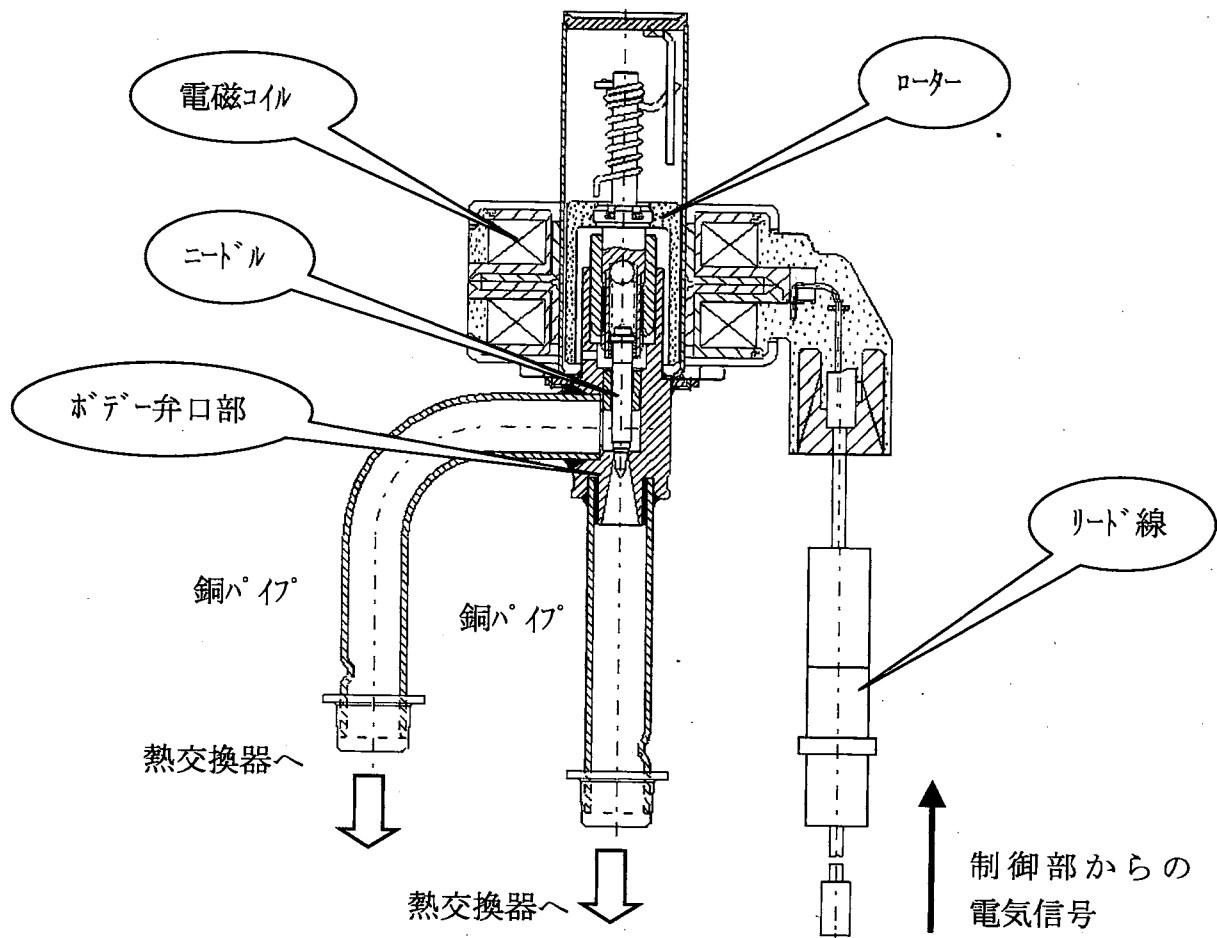


図 2

3. 研究の目的

膨張弁で発生する騒音は、ジョボジョボ、シャラシャラ、シャーという耳障りな騒音で、冷房時で圧縮機回転数が比較的低い、冷媒循環量が少ない領域で、かつ膨張弁の絞り機構部の弁開度も小さい領域で発生する傾向が、従来から指摘されていた。空気調和装置全体との関連はあるものの、膨張弁の絞り機構部の気液二相の基礎的な流体现象を研究する必要があった。従って、本研究では、絞り機構部を通過する際に発生する冷媒流体音の低騒音化のため、音源となりうる気液二相冷媒の流体现象を可視化と計測により基礎的に明らかにし、騒音測定の結果とあわせて解析し、低騒音化を達成することを目的とした。

4. 実験方法

最初に、現行品の絞り機構部を製品形状に最も近い状態で、膨張弁の絞り機構部の流れの可視化と諸特性の実験・計測をすることにより、騒音の音源とな

りうる気液二相の流体の変動現象解明を行った。

次に、現行品の研究結果で得られた知見を基に、低騒音化に対する膨張弁絞り機構部の設計変更を行った。また、あわせて膨張弁絞り機構部の形状について、現行品と設計変更品の両方を数値シミュレーションにより効果の確認を行い、設計変更品を製作した。これにより、設計変更品の絞り機構部の流れの可視化と諸特性の計測を実施し、設計変更効果の検証を行った。

最後に、システム側に提案を行うべく、膨張弁絞り機構部とシステム側を接続する銅パイプ配管部に研究対象を広げた。システム側から配管を経て膨張弁に流入する冷媒の流動様式と、膨張弁からシステム側に配管を経て流出する冷媒の流動様式を、可視化と冷媒圧力・冷媒温度の計測を行い、前述で得られた膨張弁絞り機構部の冷媒の気液二相変動現象との比較検証を行った。

5. 結論

現行品の膨張弁絞り機構部で発生する冷媒の気液二相流体现象の可視化と冷媒圧力・冷媒温度の計測のため、基礎的現象の解明を行う本実験に最適となる可視化装置と計測装置を開発した。可視化装置は、これを用いて膨張弁の絞り機構部の有効な可視化ができたため、構造と工法に関して特許を出願した。

絞り機構部を可視化装置と同形状に製作した冷媒圧力と冷媒温度の計測装置により、可視化と計測結果との比較検証ができた。絞り機構部の上流側の冷媒が、膨張弁の弁開度 16 % と 22 % において、気液二相流または単相流（液相）であることと、弁開度 29 % と 40 % において、大きさが数十 μm 程度の気泡流であることが確認された。絞り機構部下流側では、膨張弁の弁開度 16 % と 22 % では噴霧流、29 % と 40 % では層状の噴霧流が確認された。また、冷媒圧力・冷媒温度の計測結果及び冷媒 R410A の熱力学特性から、絞り機構部下流側のテーパ部のボイド率を算出した結果は、64 % ～ 82 % であった。

次に、現行品で絞り機構部テーパ部のボイド率を光ファイバーにより計測し、その測定出力からボイド率を導いて、冷媒圧力・冷媒温度・冷媒 R410A の熱力学特性から算出したものと比較した。その結果は、差異 10 % 以内であった。また、光ファイバーによる計測結果から、各条件における絞り機構部の下流側テーパ部の冷媒の気泡速度を算出した。

現行品の絞り機構部の各条件における騒音測定データを解析し、耳障りな騒音として認識される周波数と騒音値を検証した。また、冷媒の流動様式の可視化と騒音の測定結果の検証から、絞り機構部の上流側の流動様式が、騒音に対し優位的に影響することを示した。さらに、スラグ流のような大きな気泡を含んだ流れでは、絞り機構部で気泡が圧縮され、それによる圧力変動が発生し、大きな騒音となることを考察した。

次に、これまでの研究によって得られた知見を基に、絞り機構部の上流側の形状をテーパーに変更することにより、絞り機構部を通過する冷媒の流れと圧力勾配を、緩やかにした設計変更品を設計・製作した。それを現行品の実験と同様に、膨張弁の絞り機構部で発生する冷媒の気液二相流体现象の可視化と冷媒圧力・冷媒温度・ボイド率・騒音の計測を行い、比較検証をした。

設計変更品の可視化結果、膨張弁の開度 16 %において、絞り機構部上流側で冷媒流量 4 条件ともすべて液相で単相流であった。開度 40 %では、開度 16 %の事象と顕著に異なり、冷媒流量 4 条件ともすべて気泡流で、気泡の大きさは冷媒流量 4 条件とも 0.16 mm～0.48 mm の範囲であった。また、絞り機構部下流側の流動様式は、噴霧流となっており特に有意差は見られなかった。

現行品と設計変更品の可視化比較結果、絞り機構部上流側において、現行品で気泡の大きさが 2.6 mm のスラグ流が見られたのに対し、設計変更品では液相と顕著な差異が見られた。絞り機構部下流側は、ともに噴霧流であった。

設計変更品の冷媒圧力・冷媒温度の計測結果と冷媒 R410A の熱力学特性から絞り機構部のテーパー部におけるボイド率を算出した結果は 68 %～80 %で、現行品のボイド率 64 %～82 %と比較して、特に有意差は認められなかった。

現行品と設計変更品の騒音測定結果を比較すると、周波数 800～1050Hz, 2kHz～3 kHz, 6kHz～7 kHz の騒音レベルに顕著な差がみられた。設計変更品では特に耳障りな騒音は聞かれないことから、設計変更品では上述の周波数で低減されたことが、効果に繋がったものと考察した。設計変更品の構造については、特許を出願した。

最後に、膨張弁絞り機構部からシステム側配管部に研究対象範囲を拡大した。現行品では、膨張弁の上流側の配管垂直部と膨張弁絞り機構部の上流側の流動様式が全体として類似し、設計変更品ではさらに類似することが確認された。

膨張弁で問題となる騒音が発生する開度 16 %, 冷媒流量 $0.73 \times 10^{-2} \text{ kg/s}$ (26.3 kg/h)で、現行品は、膨張弁の上流側の配管垂直部と膨張弁絞り機構部の上流側の流動様式ともに、スラグ流であった。これに対して設計変更品では、同条件で膨張弁の上流側の配管垂直部と膨張弁絞り機構部の上流側の流動様式ともに、単相流（液相）であった。これは膨張弁の絞り機構部の形状が、膨張弁の絞り機構部上流に流れ込む冷媒の流動様式を変えることに起因するものと考察した。

現行品と設計変更品の双方について、膨張弁の絞り機構部上流側の配管部の冷媒圧力と冷媒温度の計測結果を基に、冷媒 R410A の圧力・エンタルピー線図と、鉛直管内上昇流の流動様式線図を用いて相状態を確認した結果、可視化結果に対し、概ね相関が得られた。

学位論文審査結果の要旨

第1、2回学位論文審査委員会を平成19年2月2日午前と午後に開催し、2月2日口頭発表を行い、同日最終審査委員会を開催した。協議の結果、以下の通り判定した。

本研究は、空気調和装置の長年の工業的重要課題である膨張弁の絞り機構部に於いて、冷媒の流動により発生する冷媒流体内の低騒音化技術の確立を目的としたものである。第一段階では現状品についての流れの可視化をおこない、流動状態と流体騒音についての関係を明らかにした。その結果、一般に絞り上流側の流動様式がスラグ流のとき、耳障りな流体内が発生することがわかった。第二段階では、冷媒流れの流動状態をよりスムーズ化することによる低騒音化を試み、試作品を用いた実験により設計変更の効果を確認することができた。この段階の研究では、ノズル形状が流れに及ぼす影響を数値計算により詳細に検討し、最適な絞り形状を開発することができた。さらに第三段階では膨張弁上流側の温度・圧力の計測、流れの可視化を行い、凝縮器を出てから膨張弁に達するまで冷媒の流動様式はほとんど変化しないことを明らかにした。尚、冷媒の可視化装置については特許出願済みである。このように本研究成果は空気調和装置絞り機構の騒音発生メカニズムを明らかにし、低騒音化に資すること大であり、博士（工学）と認定することとした。